干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆罗布泊地区白龙堆雅丹地貌形态特征及成因研究

林桂权，林永崇，王雪萍

（闽南师范大学历史地理学院，福建 漳州 363000）

摘 要：雅丹地貌是风沙地貌研究的薄弱环节，目前从形态描述到定量研究还未出现较大突破，亟待结合新的技术手段开展创新性研究。新疆罗布泊地区极端干旱，风蚀作用强烈，广泛分布着不同时期发育的雅丹，是研究雅丹地貌形态的理想区域。在Google Earth上沿着新疆罗布泊地区盛行风向测量并分析了白龙堆雅丹4个子区域共1000个雅丹个体的长度、宽度等形态参数，结果表明：白龙堆雅丹4个子区域长度、宽度和长宽比（*R*值）等形态参数存在一定区域差异，但总体上相近，其雅丹长度均值为63.42 m，65%集中在25.00~75.00 m之间；宽度均值为13.97 m，80%分布在5.00~20.00 m之间；*R*值均值为4.37，80%集中在2.00~6.00之间。白龙堆雅丹*R*值的均值总体上接近于特定风场条件下发育的雅丹*R*值（*R*=4.00）。因此，区域风蚀作用塑造了相对稳定的雅丹形态，并且这种形态基本接近于特定条件下风蚀形成的雅丹形态。尽管风动力是白龙堆雅丹形态主要的塑造动力，但是地层岩性、地表盐壳、极端干旱气候等因素也具有重要的影响。白龙堆雅丹形态变化特征可为深入理解雅丹地貌发育过程提供区域性认识。

关 键 词：雅丹；形态；成因；罗布泊

文章编号：

雅丹是一种风蚀作用形成的地貌，一般分布于降水稀少、地表平坦而裸露、风沙活动强烈的干旱区的沙漠边缘[1-5]，这些地区有利于风蚀雅丹的发育。我国是雅丹地貌主要分布区，尤其是在新疆罗布泊、哈密盆地及柴达木盆地等地区，雅丹地貌广泛发育。

对雅丹地貌的认识由来已久。早期主要是对雅丹形态的简单描述，如将雅丹地貌称为白龙堆、龙城和龙堆[6]，也有描述为剥蚀丘、泥狮、土阜、伏龙、卧狮、塔形和沙漠城等[7-11]，这些描述形象地展现出雅丹地貌多种多样的形态。对雅丹地貌的研究始于19世纪80—90年代[12-13]，主要涉及雅丹地貌的分布、形态特征、形成环境、沉积构造、发育阶段等方面[2,7-10,14-21]，其中，雅丹形态是雅丹地貌研究的重要部分。尽管风蚀雅丹地貌形态多样，但总体上划分为以下几种形态：长垄状[22-24]、流线状[25-26]和覆舟状[26-28]。而进一步定量描述雅丹地貌主要是对雅丹体的长度、宽度、高度及长宽比（*R*值）等形态参数进行分析，不同地区的雅丹*R*值差异较大，数值在1~20之间[22,29-33]。由于雅丹形态具有多样性和复杂性，目前还未提取出反映雅丹地貌本质属性的基本形态参数[34]。

流体力学与空气动力学实验表明空气动力和地质岩性是雅丹发育最重要的2种因素[2,14]，而风洞试验表明，质地均匀的岩层在特定风场风蚀作用下会形成较为稳定的雅丹形态（*R*=4.00）[14]，在这种地貌形态下，其气流阻力最小，未出现明显的背风涡流[14]。因此，虽然长期风蚀作用导致雅丹个体有所减小，但是其形态保持不变，这是一种稳定的雅丹形态[29]。但是，由于雅丹地貌形成发育过程中受到

收稿日期：2020-08-18； **修订日期**：2021-02-05

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（41601012）；科技部国家科技基础性工作专项重点项目（2014FY210500）；福建省教育厅中青年教师教育科研项目（JAT190365）；福建省高校杰出青年科研人才培育计划

作者简介：林桂权（1970-），男，高级讲师，主要从事环境演变研究. E-mail: 516359455@qq.com

通讯作者：林永崇（1983-），男，副教授，主要从事环境演变研究. E-mail: linyongchong@itpcas.ac.cn

诸如风力、地层岩性、气候、地表状况、构造运动等多种环境因素影响，各个因素作用程度的差异导致形态会出现不同程度的变化[32,34]，而这些因素怎样影响雅丹发育并进一步影响雅丹个体形态特征及区域分布还有待进一步研究。因此，对世界各地不同地区雅丹形态、地层岩性、气候特征等的研究有助于进一步理解雅丹地貌成因、发育过程及其侵蚀动力。

近20 a来，卫星遥感技术快速发展，其显著提高的影像分辨率为大量、高效、便捷提取雅丹地貌形态数据提供便利[35-36]。罗布泊地区白龙堆雅丹个体高大且大都处于独立分布状态，有利于运用遥感影像技术研究其形态特征。而目前还未见用遥感影像手段研究白龙堆雅丹形态特征的相关报道。本研究通过对白龙堆多个区域雅丹的长度、宽度和走向等形态参数进行广泛调查和测量，分析其雅丹形态特征及区域差异性，探讨白龙堆雅丹的形成原因。

1　研究区概况

白龙堆雅丹分布于塔里木盆地东部的罗布泊地区(40°26′24″~41°02′24″N，90°56′24″~91°34′12″E，图1)。罗布泊属于暖温带大陆性极端干旱荒漠气候，年平均气温为11.8 ℃，其中1月均温-10.7 ℃，7月均温26.2 ℃，气温年较差较大，极端最高温达70.0 ℃[16-17]。区域极端干旱，年平均降水量低于20 mm，而潜在蒸发量达3000 mm。由于位于东天山和阿尔泰山之间，受蒙古-西伯利亚高压作用及盆地东灌气流影响，近地表盛行稳定的东北风，多年平均风速为2.5 m·s^{-1}以上，极端最大风速40 m·s^{-1}，且主要集中在春、夏季，年平均大风(8级以上)日数18.6 d[16,37]，区域风沙活动频繁。强烈的侵蚀作用导致罗布泊地区雅丹地貌广泛发育，主要包括白龙堆雅丹、龙城雅丹、三垄沙雅丹和楼兰地区雅丹等。

罗布泊地区于三叠纪末开始沉降，于上新世成为塔里木盆地汇流中心，目前罗布泊地区沉积着巨厚的河湖相地层[38]。白龙堆雅丹发育于河湖相沉积的灰白色泥岩和砂岩上[16]，地层中含有大量的石膏等岩盐。白龙堆雅丹区长约80 km，宽约20 km，面积约1000 km^{2}[16]。白龙堆雅丹个体较为高大，长度可达300~400 m，大多呈独立分布。雅丹体纵轴与区域盛行风向一致，呈东北-西南向延伸，迎风面较陡，背风面较缓。

2　数据与方法

本研究数据主要是从Google Earth影像上获得的。Google Earth影像在白龙堆雅丹分布区的分辨率达到0.3 m，而白龙堆雅丹个体较大，运用Google Earth影像进行雅丹长宽等形态参数测量能达到足够的分辨率。另外，白龙堆雅丹大都处于完全分开状态(图2、图3)，这有利于对单个雅丹体长度和宽度的测量。我们在研究区内沿着盛行风向选取了4个子区域测量雅丹形态参数(图1)，所测雅丹体都处于各自独立分布状态(图2)。每个子区域测量250组雅丹长度、宽度和走向等(图3)形态参数，总共获得1000组数据。

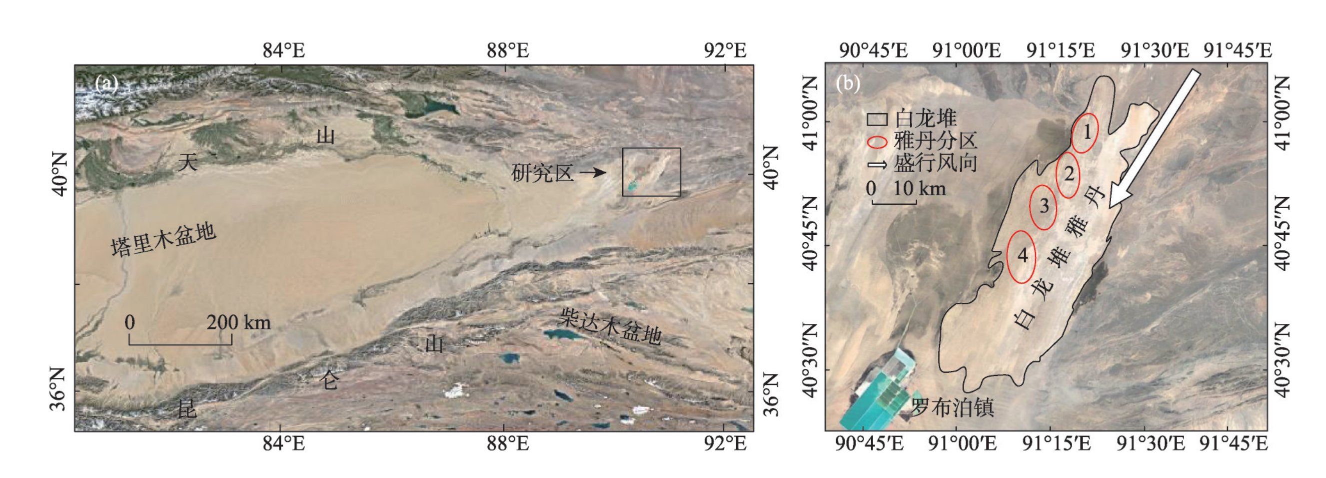


图1　白龙堆雅丹分布区

Fig. 1　Distribution of the Bailongdui Yardang

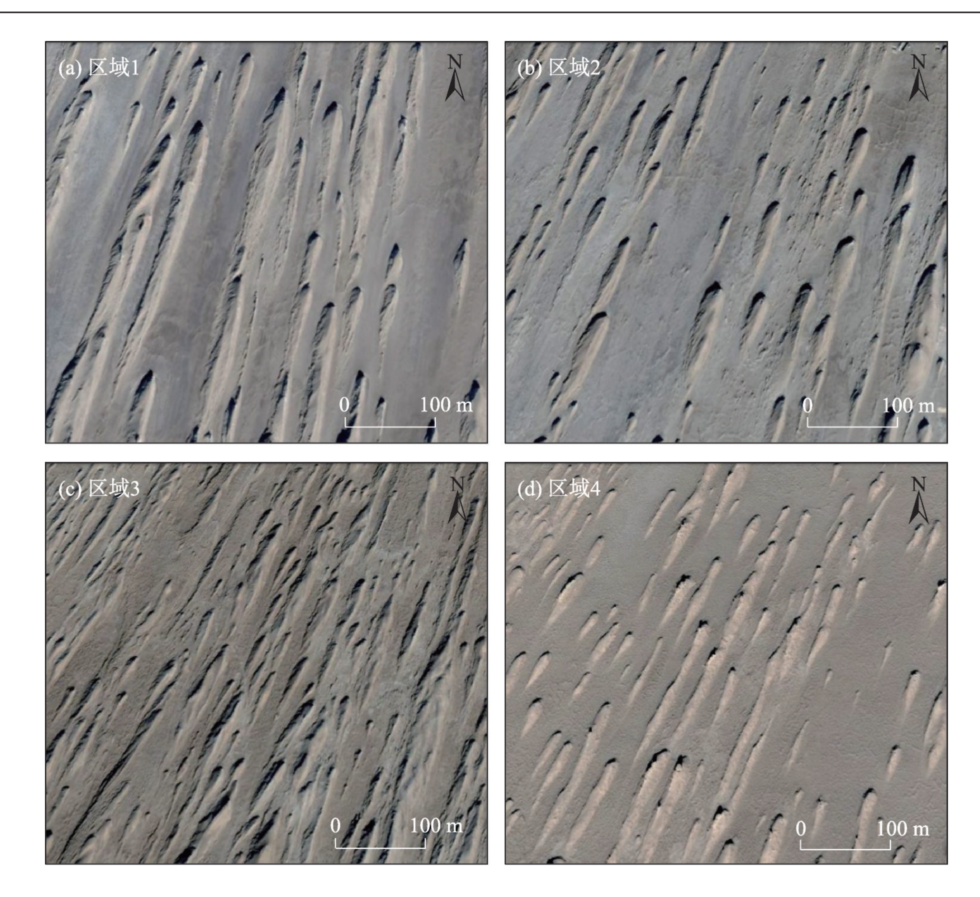


图2　白龙堆雅丹分区形态

Fig. 2　Landforms of the Bailongdui Yardang in different area

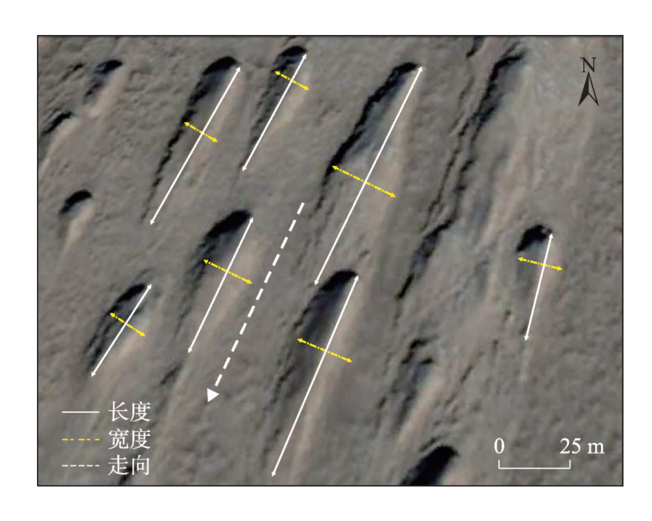


图3　白龙堆雅丹长度、宽度和走向测量方法

Fig. 3　Measurement methods of the length, width and direction of the Bailongdui Yardang

3　结果与分析

3.1　白龙堆雅丹形态特征

沿着盛行风向发育的4个区域的雅丹形态各有特点。区域1雅丹沿北东约15°延伸(图2a)，雅丹体长度在5.35~388.91 m之间，均值为97.11 m，80%集中在25.00~150.00 m之间；宽度在2.65~37.11 m之间，均值为11.17 m，90%集中在5.00~30.00 m之间；长宽比(*R*值)在1.10~16.70之间，均值为5.65，约60%集中在2.00~6.00之间(图4a1~c1)。

区域2雅丹沿北东约22°延伸(图2b)，雅丹体的长度在20.81~237.90 m之间，均值为64.75 m，70%集中在25.00~50.00 m之间；宽度在6.13~31.87 m之间，均值为15.73 m，75%集中在10.00~20.00 m之间；*R*值在2.03~10.00之间，均值4.10，约92%集中在2.00~6.00之间(图4a2~c2)。

区域3雅丹沿北东约26°延伸(图2c)，雅丹体的长度在8.92~135.48 m之间，均值为35.52 m，85%集中在9.00~50.00 m之间；宽度在4.31~27.00 m之间，均值为10.19 m，89%集中在5.00~15.00 m之间；*R*值在1.08~10.74之间，均值为3.40，约90%集中在2.00~6.00之间(图4a3~c3)。

区域4雅丹沿北东约29°延伸(图2d)，雅丹体的长度在10.65~181.30 m之间，均值为56.28 m，88%集中在10.00~100.00 m之间；宽度在2.65~28.74 m之间，均值为12.77 m，92%集中在5.00~20.00 m之

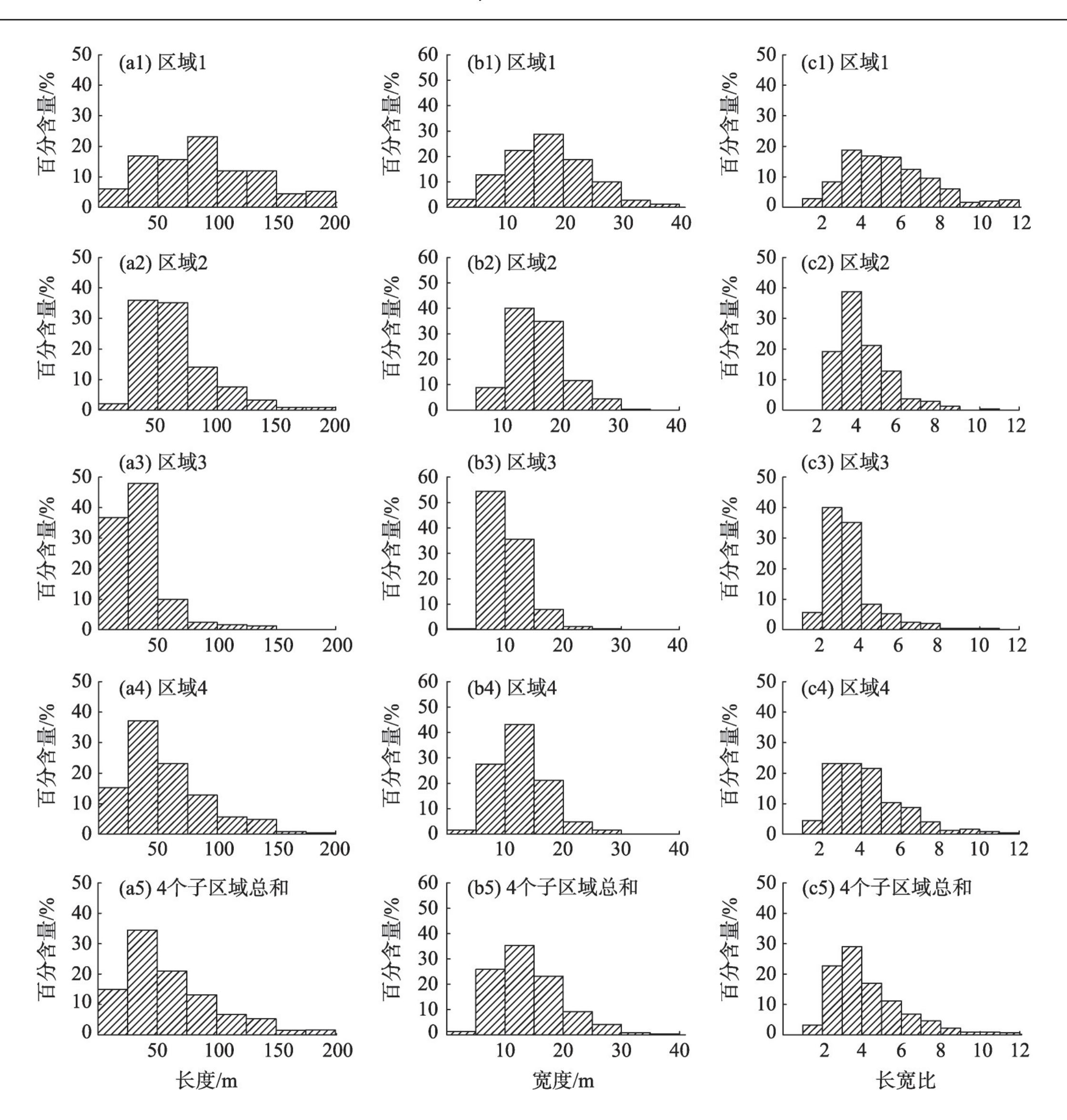


图4 白龙堆雅丹长度、宽度和长宽比(*R*值)频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of Length, width, and length-width ratio of the Bailongdui Yardang

间;*R*值在1.32~11.80之间,均值为4.32,75%集中分布在2.00~6.00之间(图4a4~c4)。

综合4个子区域1000组数据:白龙堆雅丹体长度在5.35~388.91 m之间,平均63.42 m,65%集中在25.00~75.00 m之间;宽度在2.65~37.11 m之间,均值为13.97 m,80%集中在5.00~20.00 m之间;*R*值在1.08~16.70之间,均值为4.37,57%集中分布在3.00~5.00之间,80%集中在2.00~6.00之间(图4a5~c5)。与亚洲内陆其它地区雅丹比较,白龙堆雅丹个体较高大,与柴达木盆地茫崖、大柴旦和格尔木地区的雅丹个体大小较接近,比罗布泊地区孔雀河下游楼兰地区以及阿其克谷地的雅丹个体大,但是比柴达木盆地冷湖地区和察尔汗盐湖地区的雅丹小[15-16,18,22]。

结合野外地貌考察分析,我们得到结论,白龙堆雅丹总体呈现较一致的形态特征,个体呈北东—南西向延伸,其长度、宽度和*R*值较一致,但是4个子区域也存在一定差异(图4、图5)。例如,区域1的雅丹体长度和宽度数值分布范围都较大,*R*值相对分散,而区域3长度和*R*值总体上较小。白龙堆雅丹*R*值为4.37,但是4个子区域的*R*值分别为5.65、4.10、3.40和4.32。可见,白龙堆雅丹形态存在一定的区域内差异性。

与世界各地区雅丹形态比较,尽管都分布于极端干旱区,各个地区的雅丹形态多样,有长垄状[22-24]、流线状[25-26]和覆舟状[26-28]等,其*R*值差异较大,数值范围甚至大于1.00~40.00,这些大都与白龙堆雅丹*R*

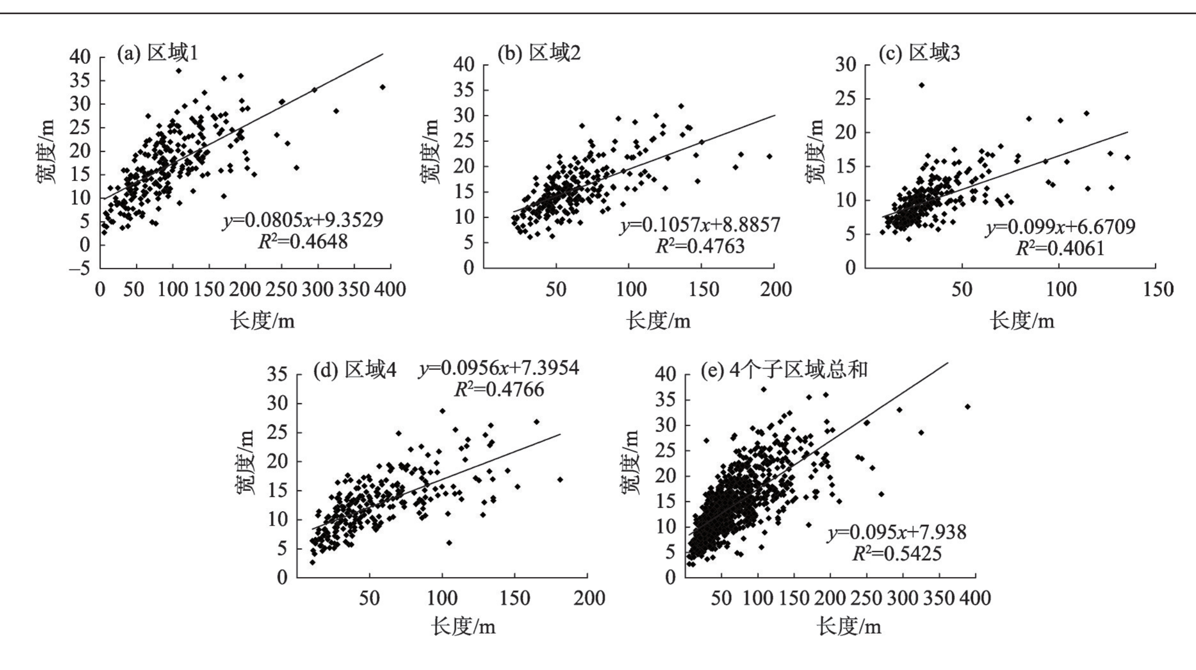


图5　白龙堆雅丹长度和宽度之间的相关关系

Fig. 5　Relationship between length and width of the Bailongdui Yardang

表1　不同地区雅丹体的长宽比值

Tab. 1　Length-width ratio of yardangs in different regions

区域	长宽比(*R*值)	来源
罗布泊地区白龙堆	4.37	本研究
风洞试验	3.23	文献[14]
柴达木盆地大柴旦区域	3.84	文献[15]
柴达木盆地冷湖区域	7.00	文献[15]
柴达木盆地茫崖区域	2.68	文献[15]
柴达木盆地格尔木区域	3.00	文献[15]
柴达木盆地东南部	3.04	文献[36]
美国加尼福尼亚罗杰斯湖地区	4.00	文献[14]
西班牙东北部埃布罗地区	4.10	文献[19]
撒哈拉沙漠博尔库地区	10.00	文献[22]
秘鲁地区	3.00~10.00	文献[23]
乍得地区	20.00~30.00	文献[39]
安第斯山中部固化雅丹	20.00~40.00	文献[40]

值存在一定差异(表1)。风洞实验显示,特定风场条件下能够形成稳定的雅丹形态(*R*值约为4.00)[14]。本研究选择独立分布状态的白龙堆雅丹进行测量,每个子区域250组数据。虽然各个子区域之间存在一定的区域差异(图4、图5),但总体上*R*值接近于特定条件下风蚀形成的稳定形态的雅丹*R*值(*R*值=4.37,决定系数R^2=0.5425;图5)。这表明尽管白龙堆雅丹个体大小不一,但其形态基本一致;研究区风蚀作用塑造了较稳定的雅丹形态,并且这种形态接近于特定条件下风蚀形成的稳定雅丹形态。

另外,不论是从4个子区域还是从整个研究区总体上看,随着白龙堆雅丹长度增加,其*R*值都有增加的趋势(图6),二者之间存在较显著的相关性(R^2=0.5641),这表明长度增加,雅丹体形态更加细长;而雅丹宽度增加,其*R*值未发生明显变化,二者无显著的相关关系(R^2=0.0400)。

3.2　白龙堆雅丹成因分析

雅丹主要是风蚀作用形成的地貌,风是雅丹发育的主要动力,但雅丹地貌发育过程中也可能受其它多种因素影响,例如,区域风场特征(风场强度、频率和风向等)、地层岩性、地表状况(地表裸露情况和植被状况)、气候条件(干燥程度)和区域构造等[14,19-21,34],其中侵蚀动力和雅丹地层的物质组成是2个主要因素[15]。这些因素共同作用塑造了雅丹地貌形态,但是在不同区域各个因素对雅丹地貌作用程度、方式有所差异[20-21,34,36],这导致雅丹形态存在一定的区域差异。

白龙堆地区具有形成雅丹地貌的基本条件。首先,受蒙古-西伯利亚高压影响,研究区盛行东北风,尤其是春、夏季,近地表强烈的东灌气流经过罗布泊地区为该区域雅丹形成发育提供强劲的风蚀动力。其次,整个研究区地层主要为河湖相沉积,水平方向上地层岩性广泛一致,是亚洲中部干旱区常见的发育雅丹的地层[15,20]。再次,白龙堆雅丹处于亚洲中部暖温带极端干旱荒漠气候区,降水极端稀

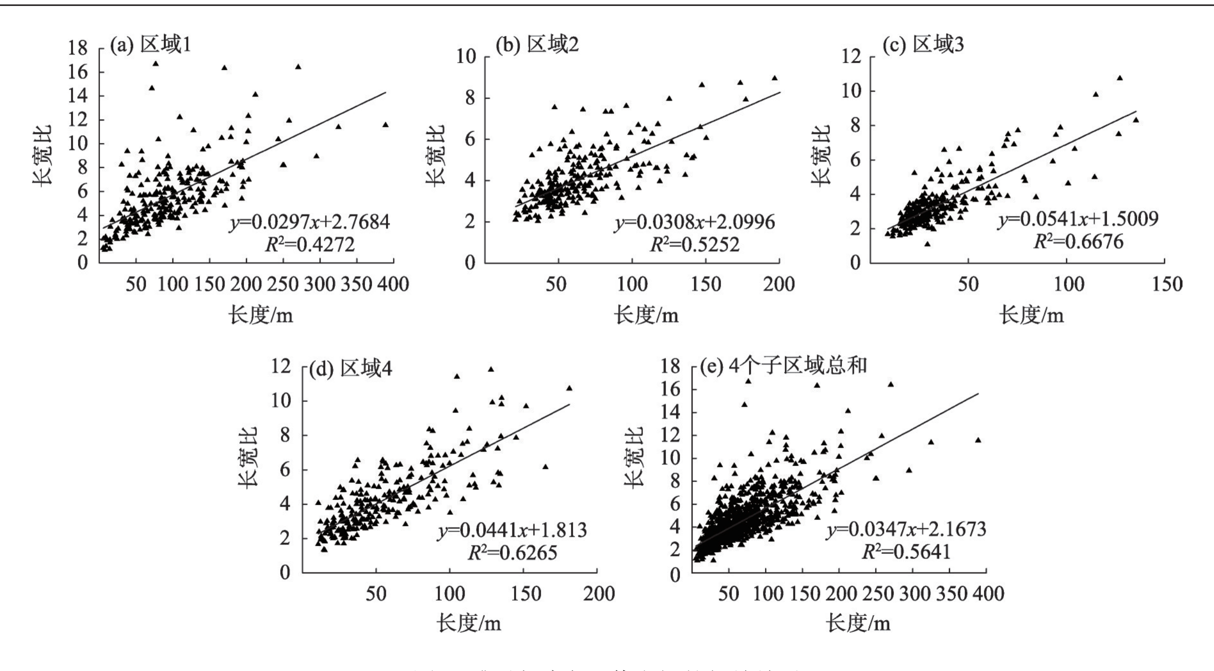


图6 雅丹长度与*R*值之间的相关关系

Fig. 6 Relationship between length and length-width ratio of the Bailongdui Yardang

少(低于20 mm),蒸发强烈(高于3000 mm)[37],常年处于极端干燥状态,这导致地表无植被生长,完全裸露。因此,白龙堆地区适合雅丹地貌发育。

另外,对白龙堆雅丹地貌形态的野外调查和Google Earth影像分析表明,白龙堆4个子区域雅丹长轴延伸方向都较为一致,呈北东—南西向延伸;研究区雅丹与罗布泊其它地区如孔雀河下游雅丹及龙城雅丹延伸方向相近,与区域近地表盛行风向一致。白龙堆雅丹展现出典型风蚀雅丹的形态特征:迎风坡陡峭,背风坡相对平缓,长轴沿着盛行风向延伸(图2)。这些雅丹不论个体大小,形态都基本一致,且接近于特定条件下风蚀形成的稳定雅丹形态(*R*值约为4.00)[14]。因此,白龙堆雅丹是风蚀作用形成的,且风蚀作用是其主要动力。

尽管风动力是白龙堆雅丹发育主要的侵蚀动力,并且我们测量的雅丹基本处于完全独立状态(指示这些雅丹可能经历更加充分的发育),但是研究区4个子区域雅丹形态(*R*值均值分别为5.65、4.10、3.40和4.32)与特定风场条件下发育的雅丹稳定形态存在一定差异(*R*=4.00)。因此,其它因素在白龙堆雅丹发育过程中很可能也起到一定作用。

野外调查发现,白龙堆雅丹地层中广泛存在石膏等岩盐。在干燥的环境中,这些结晶盐类十分坚硬,很好地起到抗风蚀作用。其次,白龙堆雅丹区地表裸露,无植被覆盖,且广泛分布着一层坚硬的盐壳。这层盐壳是在地表外动力作用下形成的:首先,强烈风蚀作用导致雅丹体含盐岩层崩塌,散落在雅丹体周边,其中的岩盐在少量降水作用下溶解,并在地表快速重新结晶形成盐壳;再次,研究区地下广泛分布卤水,在高温环境中强烈的蒸发作用,使地下卤水通过毛细管作用向地表输送[19],结晶析出大量盐分并形成盐壳。这些盐壳在白龙堆雅丹体坡脚及地表广泛形成一个坚硬的保护层,具有抵抗雅丹风蚀作用,从而影响雅丹形态发育。

总之,白龙堆雅丹主要是风蚀作用形成的,而其它因素如地层岩性、地表盐壳及极端干旱的气候条件等对雅丹地貌形态发育方向也具有一定程度的影响。

4 结 论

本研究通过Google Earth对罗布泊地区白龙堆雅丹4个子区域共1000个雅丹个体的长度、宽度及其比值等形态参数的测量和分析,主要得到以下结论:

(1) 白龙堆雅丹个体较为高大,4个子区域形态参数长度、宽度和长宽比(*R*值)等形态参数总体上相近,雅丹体长度均值为63.42 m,65%集中在25.00~75.00 m之间,宽度均值为13.97 m,80%集中在5.00~20.00 m之间,长度和宽度存在一定相关性(R^2=0.5425)。*R*值均值为4.37,80%集中在2.00~

6.00之间；随着雅丹长度增加，其形态更加细长。

（2）白龙堆雅丹形态存在一定区域内差异，风蚀作用总体上塑造了较为稳定的雅丹形态，并且这种形态接近于特定条件下风蚀形成的雅丹形态。

（3）白龙堆雅丹发育不仅受风动力影响，其它如地层岩性、地表盐壳、区域极端干旱气候等因素也对雅丹形态发育有一定影响。

参考文献（References）

[1] Goudie A S. Mega-yardangs: A global analysis[J]. Geography Compass, 2007, 1(1): 65–81.

[2] Ward A W. Yardangs on Mars: Evidence of recent wind erosion[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B14): 8147–8166.

[3] Zimbelman J R, Griffin L J. HiRISE images of yardangs and sinuous ridges in the lower member of the Medusae Fossae Formation, Mars[J]. Icarus, 2010, 205(1): 198–210.

[4] Trego K D. Yardang identification in Magellan imagery of Venus [J]. Earth, Moon, and Planets, 1992, 58(3): 289–290.

[5] Ding Z J, Zhao J N, Wang J, et al. Yardangs on earth and implications to Mars: A review[J]. Geomorphology, 2020, 364: 107230, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107230.

[6] 班固, 颜师古. 汉书[M]. 北京: 中华书局. 2000: 62–64. [Ban Gu, Yan Shigu. History of the Han Dynasty[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2000: 62–64.]

[7] Gabriel A. The southern Lut and Iranian Baluchistan[J]. Geographical Journal, 1938, 92: 193–210.

[8] Bagnold R A. An expedition to the GilfKebir and Uweinat, 1938 [J]. Geographical Journal, 1939, 93: 281–313.

[9] 黄文弼. 罗布淖尔考古记[M]. 北京: 北京大学出版社, 1948: 75–77. [Huang Wenbi. Archaeology of Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing: Peking University Press, 1948: 75–77.]

[10] Masibroda V Y. The aeolian relief of the Turfan Depression and the western Bei Shanasa reflection of local atmospheric circulation [J]. Izvestia Akad Nauk Serya Geograf, 1952(2): 25–35.

[11] Hedin S. Central Asia and Tibet[M]. New York: Scribners, 1903: 78–80.

[12] Stapff F M. Karte des unteren Khuisebtals[J]. Petermanns Geographische Mitteilungen, 1887, 33: 202–214.

[13] Walther J. Die denudation in der Wûste undihre geologische Bedeutung[J]. Abhandlungen Sachsische Gesellschaft Wissenshaft, 1891, 16: 345–570.

[14] Ward A W, Greeley R. Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California[J]. Bulletin of Geological Society of America, 1984, 95: 829–837.

[15] 刘红英, 董治宝. 柴达木盆地雅丹形态特征及成因[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 214–220. [Liu Hongying, Dong Zhibao. Morphological characteristics and genetic analysis of yardangs in Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 214–220.]

[16] 夏训诚. 罗布泊地区气候特征[C]//中国科学院新疆分院罗布泊综合科学考察队. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987: 118–131. [Xia Xuncheng. Climatic characteristics of Lop Nur area[C]//Lop Nur Scientific Expedition Team of Xinjiang Branch, Chinese Academy of Sciences. Scientific Investigation and Study of Lop Nur. Beijing: Science Press, 1987: 118–131.]

[17] 马春梅, 王富葆, 曹琼英, 等. 新疆罗布泊地区中世纪暖期及前后的气候与环境[J]. 科学通报, 2008, 53(16): 1942–1952. [Ma Chunmei, Wang Fubao, Cao Qiongying, et al. Climate and environment before and after medieval warm period in Lop Nur area, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(16): 1942–1952.]

[18] 宋昊泽. 雅丹形态参数特征及其变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [Song Haoze. Study of morphological parameters of yardangs and their changes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2019.]

[19] Gutierrz-Elorza M, Desir G, Gutierrez-Santolalla F. Yardangs in the semiarid central sector of the Ebro Depression (NE Spain)[J] . Geomorphology, 2002, 44: 155–170.

[20] 林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 新疆楼兰地区雅丹地貌差异性侵蚀特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 33–39. [Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Erosion characteristics of yardangs at Loulan Area, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 33–39.

[21] 林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 地表风化作用对楼兰地区雅丹地貌发育的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1278–1284. [Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Weathering impact on the development of yardang landforms in Loulan region[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1278–1284.]

[22] Mainguet M. Le Bourkou aspects dunmodele eolien[J]. Annales de Geographie, 1968, 77: 58–66.

[23] McCauley J F, Grolier M J, Breed C S. Yardands[C]//Doehring D O. Geomorphology in Arid Regions. New York: State University of New York, 1977: 233–269.

[24] Cooke R U, Warren A, Andrew S G. Desert geomorphology[M]. London: UCL Press, 1993.

[25] Brookes I A. Geomorphic indicators of Holocene winds in Egypt's western desert[J]. Geomorphology, 2003, 56(1/2): 155–156.

[26] Laity J. Deserts and desert environments[M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2008.

[27] Laity J. Landforms of Aeolian erosion[C]//Abrahams A D, Parsons A J. Geomorphology of Desert Environments. London: Chapman and Hall, 1994.

[28] Breed C S, McCauley J F, Whiteny M I, et al. Wind erosion in drylands[C]//Thomas D S C. Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Changes in Drylands. Chichester: John Wiley, 1997: 453–460.

[29] Halimov M, Fezer F. 8 yardangs types in Central Asia[J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie, 1989, 33(2): 205–217.

[30] Goudie A S, Stockes S, Cook J, et al. Yardang landforms from

Kharga Oasis, south-western Egypt[J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie, 1999, 116(S1): 97-112.

[31] Kate R, Odontuya E. Yardangs and dome dunes northeast of Tavan Har, Gobi, Mongolia[J]. GSA Abstracts with Programs, 2004, 36 (4): 33-36.

[32] Dong Z B, Lü P, Lu J F, et al. Geomorphology and origin of Yardangs in the Kumtagh Desert, northwest China[J]. Geomorphology, 2012, 139-140, 145-154.

[33] 宋昊泽, 穆桂金, 林永崇, 等. 雅丹共基座现象对雅丹形态测量的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 48-55. [Song Haoze, Mu Guijin, Lin Yongchong, et al. Influence of common pedestal of Yardangs on the morphological measurement[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 48-55.]

[34] 牛清河, 屈建军, 李孝泽, 等. 雅丹地貌研究评述与展望[J]. 地球科学进展, 2011, 26(5): 516-527. [Niu Qinghe, Qu Jianjun, Li Xiaoze, et al. Review and prospect of yardang landforms research [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(5): 516-527.]

[35] 胡程青. 基于多源遥感影像的柴达木盆地雅丹几何学和控制因素[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 9-10. [Hu Chengqing. Yardang geometries and control factors in the Qaidam based on multi-source remote sensing images[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 9-10.]

[36] 李继彦, 董治宝. 柴达木盆地东南部雅丹地貌形态参数研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 122-125. [Li Jiyan, Dong Zhibao. Morphological parameters of yardangs in southeastern Qaidam Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 122-125.]

[37] 杨艺, 王汝建, 刘健, 等. 新疆罗布泊45 ka BP以来沉积物粒度敏感组分记录的区域沙尘活动历史[J]. 地学前缘, 2015, 22(5): 247-258. [Yang Yi, Wang Rujian, Liu Jian, et al. Regional dust activity history during the past 45 ka reflected by sensitive grain-size components in Lop Nur, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(5): 247-258.]

[38] 夏训诚. 新疆罗布泊科学考察综述[J]. 干旱区研究, 1985, 2(1): 4-8. [Xia Xuncheng. Summary of scientific investigation in Lop Nur, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 1985, 2(1): 4-8.]

[39] Breed C S, McCauley J F, Whitney M I. Wind erosion forms[C]// Thomas D S G. Arid Zone Geomorphology. London: Belhaven Press, 1989: 284-307.

[40] Bailey J E, Self S, Wooller L K, et al. Discrimination of fluvial and eolian features on large ignimbrite sheets around La Pacana Caldera, Chile, using Landsat and SRTM-dervied DEM[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(1): 24-41.

Morphological characteristics and genesis of Bailongdui Yardang landforms in Lop Nur, Xinjiang

LIN Guiquan, LIN Yongchong, WANG Xueping

(School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract: Among aeolian landforms, studies on yardang are still lacking, with the amount of quantitative research being particularly inadequate. This lack of research data prevents a better understanding of the evolutionary process of yardang landforms. In order to quantify the morphological characteristics of Bailongdui Yardang in Lop Nur, northwest China, the length, width, and length/width ratio (*R* value) of 1000 yardangs in four subregions of Bailongdui Yardang were measured and analyzed using data based on a series of remote sensing images. The results show that the characteristics of length, width, and *R* value are similar in the four subregions. The average length of yardangs is 63.42 m, of which approximately 65% are in the length range from 25.00 m to 75.00 m; their average width is 13.97 m, with approximately 80% existing in the range from 5.00 m to 20.00 m. The average *R* value is 4.37, with 80% existing in the range between 2.00 and 6.00. Yardangs with similar *R* value are developed under specific wind field conditions; in the case of those yardangs with an *R* value of 4.00, the Bailongdui Yardangs were eroded to a stable shape, and this shape is similar for all yardangs developed under specific wind field conditions. Besides the wind, other factors, in particular the stratigraphic lithology, surface salt crust, and extreme arid climate, are also important determining factors in the yardang's formation.

Key words: yardang; morphology; genesis; Lop Nur